

## 様式 C-19

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560285  
 研究課題名（和文） 分散型電源が連系された配電ネットワークにおける高調波の面的解析に関する研究  
 研究課題名（英文） A Study on Harmonic Analysis of Distribution Network Connected Distributed Generators  
 研究代表者  
 川崎 章司（KAWASAKI SHOJI）  
 福井大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：90262609

研究成果の概要（和文）：本研究では、近年、環境負荷軽減効果や CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が期待される太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー利用分散型電源の積極的な導入が進められていることを背景に、これらの分散型電源の多数台連系が配電ネットワークにおける高調波に及ぼす影響について、フリーデザイン型の模擬配電系統実験設備を用いた実験と解析モデルを用いたシミュレーションの両面から解析を行った。また、配電ネットワーク全体で高調波を抑制することを目的としたアクティブフィルタの最適設置決定手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the authors analyzed about the influence which connection with the distribution network of many distributed generators has on the harmonics of distribution network from both sides of the experiments using scaled-down distribution system equipment and the numerical calculations using an analysis model. Moreover, the optimal installation determination method of the active filters aiming at controlling harmonics in the whole distribution network was developed.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総 計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：分散型電源、配電ネットワーク、高調波、電圧ひずみ率、模擬配電系統実験設備、インバータ、整流回路

## 1. 研究開始当初の背景

発電所－送電線－変電所－配電線で構成される巨大な電力システムにおいて、配電系統に接続された無数の負荷機器や、近年、導入が進んでいる太陽光発電や風力発電など

自然エネルギーを利用した分散型電源（以下、DG: Distributed Generator）から高調波電流が発生し、それが電圧歪みを引き起こす。これらが系統を伝搬する中で、分流したり、位相にズレが生じたりしながらある地点で合

成され、最終的な高調波電圧ひずみ率となる。インピーダンスによっては思いも寄らぬ遠隔地で歪みが拡大して発生することもある。これが自家用コンデンサ・リアクトル等の調相設備の過熱・焼損、変圧器の寿命低下、誘導機・同期機の効率低下、配電損失の増大などにつながり、家電・汎用品などにも影響を及ぼす。また、平成6年には、高調波の原因による人身事故も発生し、新聞等マスコミにも大きく取り上げられた。

高調波問題の経緯として、水銀整流器など大型の非線形負荷から高調波が発生し、これが通信線誘導障害などを誘発することは、かなり古くから知られている。近年では、パワーエレクトロニクス技術の進展に伴う高調波発生源の飛躍的な増大と、高調波電流を流しやすい本質的な性質を有する力率改善用コンデンサの普及により、通信線誘導障害以外の高調波問題がクローズアップされてきており、電気学会や電気協同研究会といった中立的かつ公的な技術報告書のテーマとして、電力系統側の観点から、負荷機器側の観点から、および機器を設置する需要家の観点から高調波問題が取り上げられてきている。また、行政の観点からも通商産業省資源エネルギー庁(当時)長官の私的懇談会の報告書においても高調波問題が大きく取り上げられ、この報告書で初めて具体的な高調波管理目標(総合電圧ひずみ率:配電系統 5%, 特別高圧系統 3%)が記述され、現在に至っている。また、インバータ応用機器などの高効率機器(高調波を発生する非線形機器)の普及率が際立って高い我が国の実態は、今後このような機器が普及してくるであろう諸外国からも大いに注目されている。

高調波発生源の一つとして考えられる代表的な機器として、電気鉄道などの三相整流回路、電気炉などの電力調整回路、テレビ・パソコンなどの単相整流回路、およびインバータエアコン・太陽光発電などのインバータ回路がある。これらの内部回路では、半波整流、全波整流、半波整流コンデンサ平滑、全波整流コンデンサ平滑、全波位相制御など様々な回路が用いられ、これらは全て電流波形が異なっている。電流源から発生した高調波電流は、上位系統、負荷のあらゆる方向に向かって流れて行くが、上位系統も構成が複雑であったり、特別高圧、高圧、低圧需要家の負荷には定電力特性のものや定電流特性のものがあ

り、調波電流は流入と流出の合成であり正確に分離することは困難で、ある程度の仮定に基づいたシミュレーションによって分離しなくては、流入量および流出量を求めることができない。

上述のように高調波解析はあまりにも不確定要素が多く、計算値と実測値が単純に一致しないことから検証も困難であるため、高調波解析は現時点で確立されていないといえることができる。計算機シミュレーションだけではその複雑な配電系統のモデル化も含め不十分であり、また、実際に運用している配電系統において種々の興味ある実験は不可能であり、実測するだけで再現性の問題などを含め詳細な解析までは困難であった高調波解析の現状を踏まえ、前述した高調波発生源であるインバータを必要とする太陽光発電などの DG や、インバータにより駆動される誘導機、ならびに整流回路を有するテレビ、パソコンなどの負荷、更に、高調波の影響を受ける変圧器、自家用コンデンサの調相設備などを持つ「模擬配電系統実験設備」を構築することを考えた。この設備を構築することができれば、これまで困難であった高調波に関する種々の実験、ならびに詳細な解析が可能になると考える。

筆者らは、配電系統を用いた自由な実験ができないために停滞していた電力工学分野の研究開発の壁を打破するために、誰もが研究開発目標に応じて自由に設計・使用が可能な 1/30 電圧スケールの実験設備を「フリーデザイン模擬配電系統実験設備」と名づけ、東京電力(株)配電部の協力のもとで、2005 年度福井大学内に設置している。この実験設備の特徴は、配電系統の基本構成要素である、実データに基づく三相配電線、単相負荷、三相負荷、DG などの各模擬設備を自由に相互接続可能な一つのパーツとして予め製作しておく、研究者・技術者が研究目的に応じてそれらのパーツを自由に接続して、独自の配電系統を構成し、自由に実験できる枠組みをとっている点にある。また、この配電系統を用いた電気量の計測や計測データの解析等を行うことで、実系統ではコスト面から実測していない地点での電気特性等が把握できることから、これらの実測データを用いた高精度の系統管理技術の開発に大きく貢献できる。また、他の研究機関から試作装置や試作プログラムを持ち込んで、技術の比較検証を行うための「ベンチマーク実験システム」としての活用も可能である。また、実際の配電系統における変圧器などのデータや電灯負荷、動力負荷など負荷データに基づき、配電ネットワークにおける高調波解析が可能な標準解析モデルを東京電力(株)と共同で構築している。

## 2. 研究の目的

本研究では、詳細な高調波解析が可能となるように、前述のフリーデザイン模擬配電系統実験設備に、高調波発生源であるインバータにより駆動される誘導機、DG、整流回路を有する蛍光灯、テレビ、パソコンなどの非線形負荷、更に、高調波の影響を受ける変圧器、調相設備などを追加し、種々の実験ならびに解析を行う。また、電力工学分野において世界的に利用され信頼性の高い電磁過渡現象プログラム EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) や Matlab を用いて、前述の標準解析モデルにおける計算機シミュレーションとの比較検討を行う。更に、多数台の DG の連系が、面的に広がる配電ネットワークにおける高調波に及ぼす影響について、標準解析モデルを用いて解析を行い、配電ネットワーク全体で高調波を抑制するための手法を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) インバータおよびインバータ駆動定トルクモータ(誘導機)を動力負荷として、抵抗とリアクトルを接続した三相整流ブリッジ回路を非線形負荷として、既存のフリーデザイン模擬配電系統実験設備に接続する。また、三相 200V 系統の模擬配電系統を、変圧器を用いて単相 100V に変圧し、整流回路を内蔵しているパソコンやテレビなどを接続する。これらの各装置を接続して配電系統を構成して、系統の各地点における電圧および電流の瞬時データを計測する。次に、得られた実測データを周波数解析して、各々の負荷機器から発生する高調波が、配電系統に及ぼす影響について解析を行う。

(2) また、実験では不可能な、面的に広がる配電ネットワークにおいて、多数台連系された DG から発生する高調波が配電ネットワークに及ぼす影響について標準解析モデルを用いて解析を行う。更に、アクティブフィルタを配電ネットワークに最適に設置することにより、配電ネットワーク全体で高調波を抑制する手法を構築する。

## 4. 研究成果

### (1) 家電機器が系統の高調波に及ぼす影響

系統状況として、図 1 の 3 地点に繁華街重負荷時(14 時)に相当する三相平衡の負荷を設置した。構築した配電系統の node2 (V-W 相間) に変圧器を介して家電機器を設置した。実験で使用する家電機器は、液晶ディスプレイ、電子式蛍光灯、ノート型 PC、デスクトップ型 PC の 4 機器とした。得られた計測データに FFT (Fast Fourier Transform) を適用し、家電機器が系統の高調波に及ぼす影響について解析した。まず、家電機器から発生する高調波電流が、系統の電圧ひずみを悪化させる要因となるか検証を行う。

そこで、家電機器から発生する高調波電流量と系統の総合電圧ひずみ率の最大値の関係を図 2 に示す。今回実験で使用した 4 機器に関して、高調波電流発生量の増加に伴い系統の電圧ひずみ率が悪化することが図 2 から確認できる。次に、家電機器から発生する高調波電流の各次高調波成分の割合から、系統に最も影響を及ぼす高調波成分を解析する。家電機器から発生する各次高調波成分の割合を図 3 に示す。図 3 から、4 つの家電機器において、3 次の高調波発生量が最も多いことがわかる。低圧配電系統においては、家電機器から発生する 3 次高調波が支配的となり、電圧ひずみ率を悪化させる主要因であると考えられる。

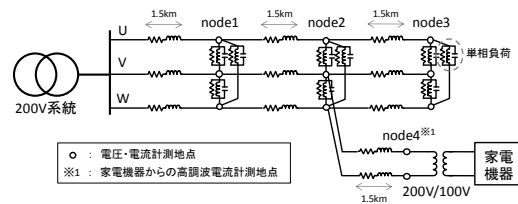


図1 家電機器を接続した配電系統モデル

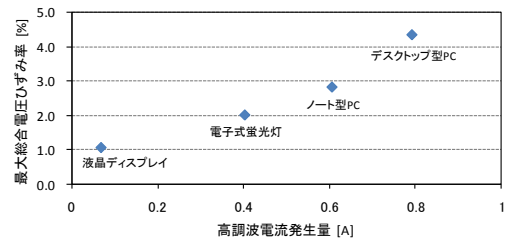


図2 家電機器から発生する20次以下の高調波電流に対する系統の最大総合電圧ひずみ率

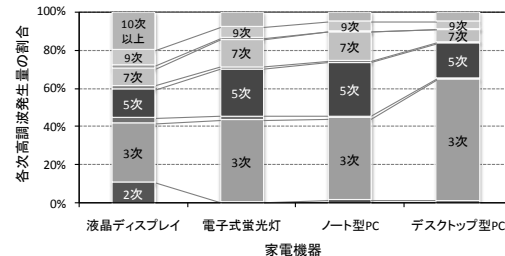


図3 家電機器から発生する各次高調波成分の割合

### (2) DGの多数台連系が系統の高調波に及ぼす影響

DGの多数台連系が系統の高調波に及ぼす影響について解析を行い、DG連系台数の増加がどの帯域の高調波電圧に影響を及ぼすかについて、また、DGの多数台連系による高調波電圧の増減現象について解析した。図4に示したDG模擬装置をDG<sub>1</sub>からDG<sub>5</sub>まで順次連系台数を増やしていき、その都度計測実験を行う。DG1台当りの出力は、系統総負荷の10% (軽負荷時: 0.2kW/台, 重負荷時: 0.7kW/台) に設定し、系統に連系した。

DG未連系時の全ノードの高調波電圧に対するDG1台連系時の全ノードの高調波電圧

の変動率を図5に示す。5次および7次の低次の高調波電圧の変動は小さいが、9次以降の高次の高調波電圧は大きく変動していることが見て取れる。同様に、DG未連系時の全ノードの高調波電圧に対するDG5台連系時の高調波電圧の変動率を図6に示す。高次高調波電圧の変動は、DG1台連系時と同様であり、DGの多数台連系による顕著な影響は確認できないが、DG1台連系時には変動の小さかった5次および7次の低次高調波電圧に関しては、DGの多数台連系により各ノードの電圧変動率が增大していることが見て取れる。

DG連系台数の増加に伴い、高調波電圧がDG未連系時よりも上昇する地点数の割合を表1に示す。表1から、低次高調波電圧( $V_5, V_7$ )は、DG連系台数の増加に伴い電圧上昇地点数が増加していることが分かる。また、高次高調波電圧( $V_{11}, V_{13}, V_{15}, V_{17}, V_{19}$ )は、DG連系台数に関わらず、DG連系によりほぼ全ての地点で電圧が上昇することが確認できる。

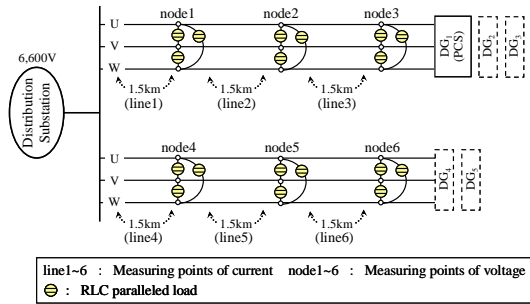


図4 DGを多数台連系した配電系統実験構成

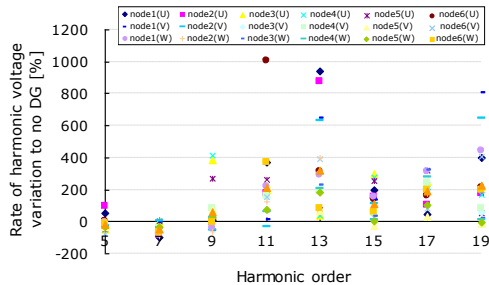


図5 DG未連系時に対する全ノードの高調波電圧変動率  
(6時、DG1台連系時)

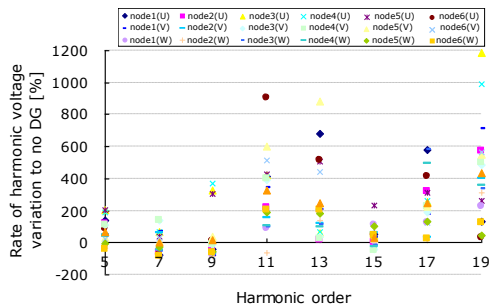


図6 DG未連系時に対する全ノードの高調波電圧変動率  
(6時、DG5台連系時)

表1 DG連系台数の増加に伴う高調波電圧上昇地点数の割合

Number of connecting DGs	Rate of nodes risen harmonic voltage [%]							
	$V_5$	$V_7$	$V_9$	$V_{11}$	$V_{13}$	$V_{15}$	$V_{17}$	$V_{19}$
1	22	11	61	94	100	94	100	89
2	22	28	17	89	100	89	78	94
3	44	44	61	94	100	100	78	94
4	78	44	39	94	100	100	100	100
5	78	50	28	94	100	67	100	100

(3) DGの多数台連系が配電ネットワークに及ぼす影響とアクティブフィルタの最適設置による高調波抑制効果

DGの多数台連系が配電ネットワークの高調波に及ぼす影響について、また、その抑制対策として、本研究で開発したアクティブフィルタの最適設置決定手法を用いてアクティブフィルタを最適に設置した場合における配電ネットワーク全体での高調波抑制効果について視覚的に定量的に解析を行った。図7に、DGが多数台連系された配電ネットワークの解析モデルおよび得られたアクティブフィルタの最適設置箇所を示す。図8(a)~(c)に、DGが連系される前、連系された後、およびアクティブフィルタを最適設置した後の図7のバンク2の各フィーダにおける総合電圧ひずみ率の24時間推移を示す。図8(a)と図8(b)を比較してわかるように、DGを多数台得連系することにより、とくにDGが多数台得連系されているフィーダBと、DGが連系されなかつ回線長が他に比べて長いフィーダHにおいて、総合電圧ひずみ率が增大して管理目標値(5%)を超えてしまっている。また、フィーダKをはじめDGが連系されていないフィーダにまで配電ネットワーク全体でDGの影響を受けて総合電圧ひずみ率が増加していることが見て取れる。これに対して、アクティブフィルタを配電ネットワーク上に最適な箇所に最適なゲインで設置(図7参照)することにより、配電ネットワーク全体で24時間に亘り総合電圧ひずみ率を管理目標値以内に大きく抑制できていることがわかる。また、フィーダや時間帯によっては、DGを連系する前よりも抑制できていることが見て取れる(図8(c)参照)。

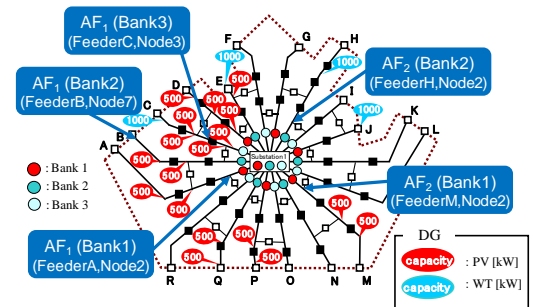
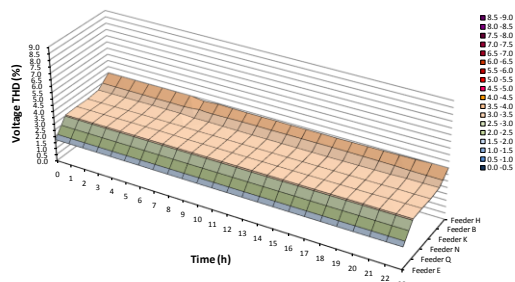
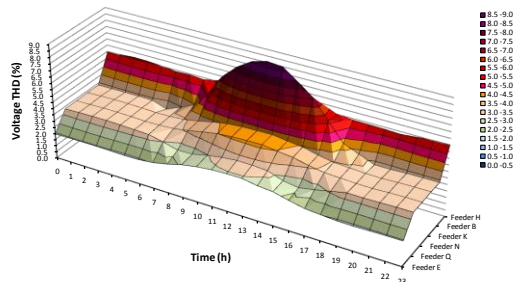


図7 DGが多数台連系された配電ネットワークモデルと  
アクティブフィルタの最適設置箇所

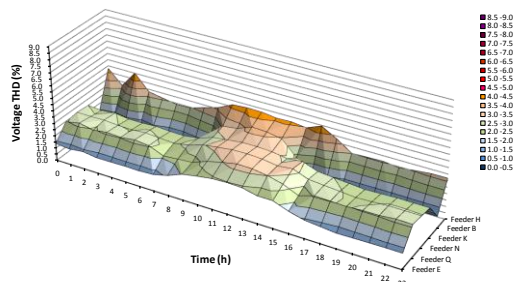




(a) DG 連系前



(b) DG 多数台連系後



(c) アクティブフィルタ最適設置後

図8 バンク2の各フィードにおける総合電圧ひずみ率の24時間推移

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 菊谷裕隆, 北條昌秀, 分散型電源が連系された配電ネットワークにおけるアクティブフィルタの最適設置決定手法, 電気学会論文誌B 電力・エネルギー部門誌, 査読有, 129 巻, 9 号, 2009, pp.1115-1122

〔学会発表〕(計13件)

- ① 川崎章司, 松木純也, 下田一貴, 田中基寛, 林 泰弘, 分散型電源連系インバータによる系統規模での総合電圧ひずみ率抑制方法に関する研究, 平成 22 年電気学会全国大会, 2010

- ② 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 下田一貴, センサ開閉器情報を利用した分散型電源連系インバータによる系統の総合電圧ひずみ率抑制方法に関する基礎研究, 平成 22 年電気学会電力系統技術研究会, 2010
- ③ 下田一貴, 川崎章司, 松木純也, 田中基寛, 分散型電源連系インバータの PQ 制御及び AF 動作による開閉器情報を利用した系統の電圧ひずみ率抑制方法に関する基礎研究, 平成 21 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2009
- ④ 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 下田一貴, 分散型電源連系インバータの PQ 制御及び AF 動作による系統の電圧ひずみ率抑制方法の検討, 平成 21 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2009
- ⑤ 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 下田一貴, 分散型電源系統連系インバータの PQ 制御による系統の電圧ひずみ率抑制方法の検討, 平成 21 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2009
- ⑥ S.Kawasaki, Y.Hayashi, J.Matsuki, Analysis on Harmonics of Distribution Network with Distributed Generators, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2009, 2009
- ⑦ 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 橋本祐一, 多田泰之, 分散型電源の多数台連系が配電系統の高調波に及ぼす影響の実験による解析, 平成 20 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2008
- ⑧ 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 橋本祐一, 下田一貴, 家電機器を配電系統模擬実験設備に設置した計測実験による高調波解析, 平成 20 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2008
- ⑨ S.Kawasaki, Y.Hayashi, J.Matsuki, H.Kikuya, M.Hojo, Optimal Allocation and Gain of Active Filter for Distribution Network Connected Distributed Generation, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2008, 2008
- ⑩ 橋本祐一, 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 配電系統模擬実験設備を用いた分散型電源連系が系統の高調波電流に及ぼす影響の解析, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008
- ⑪ 橋本祐一, 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, インバータ利用分散型電源が連系された配電系統模擬実験設備での高調波解析, 平成 19 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2007
- ⑫ 橋本祐一, 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 配電系統模擬実験設備を用いた分散

型電源連系パターンの違いによる高調波解析, 平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2007

- ⑬ 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 橋本祐一, 分散型電源が連系された配電系統模擬実験設備での高調波解析, 平成 19 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2007

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川崎 章司 (KAWASAKI SHOJI)  
福井大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 90262609

### (2) 研究分担者

林 泰弘 (HAYASHI YASUHIRO)  
早稲田大学・大学院先進理工学研究科・教授  
研究者番号: 40257209  
(H20→H21: 連携研究者)